

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 06-232418

(43)Date of publication of application : 19.08.1994

(51)Int.Cl.

H01L 29/804

G01R 33/02

G01R 33/035

(21)Application number : 05-017144

(71)Applicant : NEC CORP

(22)Date of filing : 04.02.1993

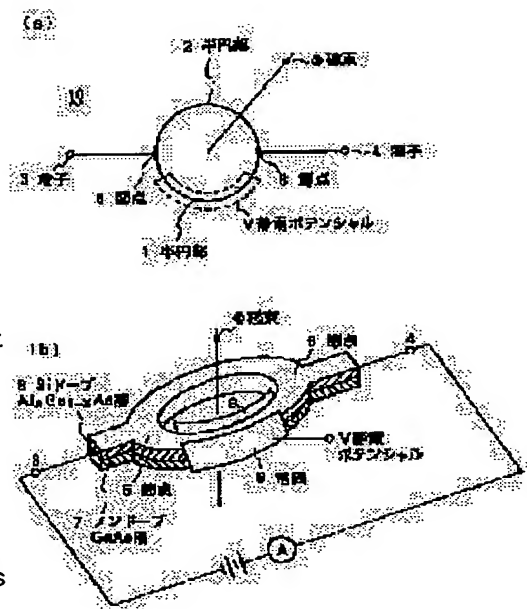
(72)Inventor : TAKAI DAISUKE
OTA KUNIKAZU

(54) AB EFFECT ELEMENT

(57)Abstract:

PURPOSE: To obtain an AB effect element capable of preventing a measuring system from exerting a bad influence on a system to be measured, by detecting a current change produced by changing electrostatic potential, and measuring the strength of magnetic flux passing a ring.

CONSTITUTION: An electron wave enters an AB ring from a terminal 3, and is separated into paths of the semicircular parts 1 and 2 of the ring at a nodal point 5. And the electron wave separated into a semicircular part 1 is phase-modulated by both magnetic flux Φ ; and electrostatic potential V, and the electron wave separated into the semicircular part 2 is phase-modulated only by the magnetic flux Φ , and a resultant wave is formed at a nodal point 6. And, magnetic flux density B is determined by the fitting of a measured value of the conductance G between terminals 3 and 4 to a theoretical curve, since the electrostatic potential dependency of the conductance G changes by the magnetic flux density B. Accordingly, it becomes possible to perform high-sensitivity measurement without any interference by the measuring system, since measurement of the magnetic field is performed by using the electrostatic potential, and the electrostatic potential can be obtained by measuring the dependency of the conductance to the magnetic flux passing the ring.



(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-232418

(43)公開日 平成6年(1994)8月19日

(51)Int.Cl.⁵

識別記号

庁内整理番号

FI

技術表示箇所

H 0 1 L 29/804

G 0 1 R 33/02

33/035

8203-2G

8203-2G

7376-4M

H 0 1 L 29/ 80

A

審査請求 有 請求項の数 8 OL (全 9 頁)

(21)出願番号

特願平5-17144

(22)出願日

平成5年(1993)2月4日

(71)出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72)発明者 高井 大祐

東京都港区芝五丁目7番1号日本電気株式会社内

(72)発明者 太田 邦一

東京都港区芝五丁目7番1号日本電気株式会社内

(74)代理人 弁理士 京本 直樹 (外2名)

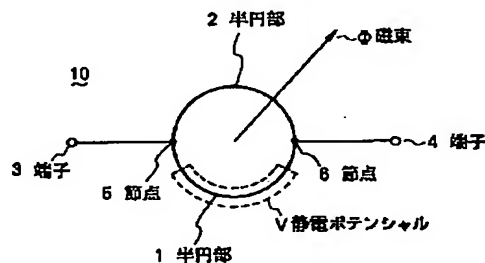
(54)【発明の名称】 AB効果素子

(57)【要約】

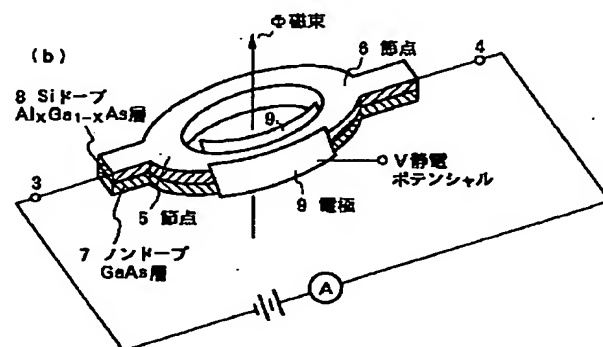
【目的】 高感度の磁界測定、ポテンシャル測定を行う。

【構成】 ABリングの端子3より電子波が入射し節点5でリングの半円部1、2の二つのパスに分かれる。半円部1に入射した電子波は磁束Φと静電ポテンシャルVの両方から、半円部2に入った電子波は磁束Φのみから位相変調を受け、節点6で合成波を形成する。端子3、4間のコンダクタンスGの静電ポテンシャル依存性は磁束密度Bによって変化するので、コンダクタンスGの測定値と理論曲線のフィッティングによって磁束密度Bを決定する。磁場の測定に静電ポテンシャルを使うので測定系による干渉がなく高感度である。一方静電ポテンシャルはコンダクタンスの、リングを通過する磁束依存性を測定することで得られる。静電ポテンシャルの測定に磁場を使うので測定系による干渉がなく同様に高感度に測定ができる。

(a)



(b)



(2)

1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 電子の弾性散乱長の数倍程度までの長さの細線でリングを形成し、このリングの対称の位置に端子を設け、この二端子でリングを区切ったときの少なくとも片方のリングに静電ポテンシャルを印加し、電子波が端子からそれぞれリングの半環を伝搬するときに前記静電ポテンシャルの印加の有無で位相が変調される効果と、リングを通過する磁束によって位相差が変調される効果の両方の効果によって電子波の干渉効果を起こし、これによって端子間に流れる電流の変化を起こさせるA

B効果素子であって、端子間のコンダクタンスの静電ポテンシャル依存性を測定することによってリングを通過する磁束強度を得ることを特徴とするA B効果素子。

【請求項2】 静電ポテンシャルを変化させる代わりに、端子間のコンダクタンスのリングを通過する磁束密度依存性を測定することによって静電ポテンシャルを得る請求項1に記載のA B効果素子。

【請求項3】 A B効果素子を複数段接続することによって、静電ポテンシャルまたは磁束による伝導度変調を*

$$\phi = \left(\frac{\sqrt{2m^*}}{\hbar} \right) (\sqrt{E+eV} - \sqrt{E}) L$$

(ここで ϕ はリングの二つの半環を電子波が通過したときに生じる位相差、 m^* は

電子の有効質量、 \hbar はディラック定数 ($\hbar/2\pi$)、 E は電子のフェルミエネルギー、 e は電子の電荷、 V は静電ポテンシャル、 L はリングの半環それぞれの経路長である。)

【請求項7】 A B効果素子に強磁場を印加して電子が円運動を描く軌道半径 (ランダウ軌道半径) がリングの太さよりも小さく電子がリングの端に沿ってリングを通過するようにして電子の有効質量を測定する手段を有する請求項6に記載の有効質量測定装置。

【請求項8】 電子の弾性散乱長の数倍程度までの長さの細線でリングを形成し、このリングの対称の位置に端子を設けたA B効果素子を、静電ポテンシャルと、リングの半環のそれぞれの径路長 L と、フェルミレベルの電*

$$(\sqrt{2m^*}/\hbar) \sqrt{E} L = n\pi$$

$$\phi = 1\pi$$

(ここで θ 、 ϕ はリングの二つの半環を電子波が通過したときに生じる磁場およびポテンシャルの位相差、 m^* は電子の有効質量、 \hbar はディラック定数 ($\hbar/2\pi$)、 E は電子のフェルミエネルギー、 e は電子の電荷、 L はリングの半環それぞれの経路長、 B は磁束密度、 S はリングの面積、 n 、 1 は整数である。)

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は電子波干渉素子を用いた磁界あるいはポテンシャルの測定素子、トランジスタ、電子の有効質量 m^* の測定装置、または磁束量子 Φ_0 ($\Phi_0 = h/e$) の測定装置に関する。

2

* 急峻にした請求項1または2に記載のA B効果素子。

【請求項4】 A B効果素子を複数段接続することによって、磁束による伝導度変調を急峻にし、しかも静電ポテンシャルによってその変調を調整する請求項3に記載のA B効果素子。

【請求項5】 A B効果素子を複数段接続することによって、静電ポテンシャルによる伝導度の変調を急峻にし、しかも磁束によってその変調を調整する請求項3に記載のA B効果素子。

【請求項6】 電子の弾性散乱長の数倍程度までの長さの細線でリングを形成し、このリングの対称の位置に端子を設け、この二端子でリングを区切ったときの少なくとも片方のリングに静電ポテンシャルを印加するA B効果素子を、静電ポテンシャルを変化させたときのコンダクタンスの周期的な変化を測定する手段と、その周期を下記理論式と比較することによって電子の有効質量を測定する手段を有する有効質量測定装置。

【数1】

※ 子波長を下記の二つの式を満足するようにして、二端子間のコンダクタンスの磁束依存性が磁束量子 Φ_0 ($\Phi_0 = h/e$) の周期で鋭いピークを示し、それ以外ではほぼ0になるような共鳴条件を満足させ、この条件下で隣接したピーク間の磁場を測定する手段と、磁場の位相差 $\theta = 2\pi$ としたとき $2\pi = BS/\Phi_0$ から磁束量子 Φ_0 を測定する磁束量子測定装置。

【数2】

【0002】

【従来の技術】 従来、磁気構造検知については種々の方法が開発されてきた。電子ビーム試料の微小領域に照射し、そこから反射電子スピンの情報から磁気構造を知るスピンSEM (Spin Scanning Electron Microscope) は広く知られている

(3)

3

方法である。しかし、この方法では原子レベルの磁気構造まで調べることは困難であった。そこで、AB効果を用いた磁気構造検知装置が特開平3-61880号公報に記載されている。グラファイトの先端をとがらせて探針とし、この探針を検知対象物にSTM (Scanning Tunneling Microscope) 観察のように近接させる。グラファイトはベンゼン環で構成されているが、ベンゼン環の電子雲は環状であるのでこれを電流ループ(磁気感知部)として用い検知対象物と感知部とをSTM観察のように相対的に移動させると、この微小な電流ループに流れる電流は原理的に電流ループ内の全磁束に応じて振動する(アハラノフボーム効果: AB効果)。これによって対象物の微小領域の磁気構造を検知するというものである。なおフィジカル・レビュー(Physical Review) 115巻(1959) p485によれば、AB効果とは、電子波が可干渉性を維持しながら二つの電子波に分割されて伝搬し再び合流するとき、その二つの電子波の進路によって囲まれる空間を貫通する磁束の量によって、その二つの電子波の位相差が変化する現象である。

【0003】また特開平2-124540号公報には次のような量子干渉光素子が記載されている。マッハツエンダー干渉計(ループ状の光の導波路)のループの部分に変調のための光または磁束をあてる。光には磁場成分があるので、光の強度を変調すると磁場強度を変調したことになり、量子干渉効果により出射光の強度が変調される。これを光検出、二次元位置センサ、または和、差、否定などの光論理素子に利用する。

【0004】また特開平4-61171号公報には、電界効果トランジスタのチャネルをループ状に形成し、ループの片側にだけゲート電極を設けゲート電圧を印加することで両チャネルを走行する電子波の間に位相差を生じさせることあるいはゲート電圧印加の代わりに光入力ゲートを設けてそこに光を照射することで、素子サイズを縮小し、低電界(低光エネルギー)動作させることが記載されている。

【0005】また特開平3-129881号公報に記載の量子干渉トランジスタでは、ループの片側にゲート電極を複数設けゲート電圧を印加することで、両チャネルを走行する電子波の間に位相差を生じさせ、論理演算(EX-OR等)を行うことが記載されている。また特開平2-130964号公報には、電子の弾性散乱長、非弾性散乱長に比べ小さい寸法を持ついわゆる量子細線を用いて複数のループを形成し、入力信号に対応する磁場をループに鎖交させることで電子波の位相差を生じさせて特性が変動したときにも正常動作を可能にするトランジスタが記載されている。

【0006】また特開平1-226182号公報には、次のような技術が記載されている。GaAs基板にリング形状にn型領域を設け絶縁膜を介してその上に超伝導

4

リングを形成し、さらにその上に絶縁膜を介して磁場発生用コイルを設ける。超伝導リングの電荷担体の電荷は $2e$ であるので、この超伝導体リングを貫く磁束は $h/2e$ を単位に量子化される。これを利用して素電荷測定を行う。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】特開平3-61880号公報に記載された磁気構造検知装置では、ベンゼン環の面積 S は極めて小さいのでこのときの量子磁束 Φ_0 に対応する磁束密度 B は $B = \Phi_0 / S$ の関係から数Kテスラという極めて強い磁場になってしまい、磁気センサーとしては意味がない。しかもベンゼン環内の電流をどのように測定するのが原理的に不明である。またこの磁気構造検知装置では測定系から磁場が発生しそれが被測定系に影響を与え、検出限界が規定されていた。例えばスピン系の磁化の測定を考える。色々なケースが考えられるが、強磁性体の臨界点近傍の温度における磁化を測定する場合、磁化はわずかな外部磁界でも変化してしまう。DCの磁界 $H_D C$ に対応する磁化 $M(H_D C)$ を測定するためには、この特開平3-61880号公報も含めて従来は $H = H_D C + H_A C \cos \omega t$ ($H_A C$ は交流の振幅、 ω は角周波数、 t は時間)のような外部交流磁界 H を印加し、交流の応答 $M'(H) \cos \omega t$ を測定していた。しかし交流磁界 HAC によって磁化 M が乱されるので、 $H_D C / H_A C$ 比及び測定回路で制限を受ける $H_A C$ によって測定できる最小の $H_D C$ が制限されてしまう。具体的限界は場合によって違うが、大体 $H_D C / HAC = 10^2 \sim 10^4$ と思われる。

【0008】また他の上述の発明は素子サイズの縮小、低電圧動作、論理演算を行うことや光の検出、位置の検出を目的としているが、トランジスタを構成したときのスイッチング特性の向上については言及されていない。

【0009】また特開平1-226182号公報ではリングを構成する材料が超伝導材料であるため、リングの一部に電圧を印加してもリング電流を制御することができない。また磁束 Φ によるリング電流の変化を見る方法では、リング径を小さくすることが難しい。これは小型化する即ち面積 S を小さくすると、 $B = \Phi / S$ の関係から非常に大きい磁束密度 B が必要になってしまいそのためリングに大電流を流す必要が出てくるからである。また半導体基板上に超伝導リングを形成する必要がある製作条件が複雑になってしまう。

【0010】本発明の目的は測定系が被測定系に悪影響を及ぼさないAB効果素子を提供することにある。またトランジスタとして用いるときのスイッチング特性を向上させることにある。

【0011】

【課題を解決するための手段】本発明はリングに電場と磁場の両方を作用させ、磁束強度の測定は端子間のコンダクタンスの静電ポテンシャル依存性を測定することで

50

(4)

5

行う。磁場の測定に静電ポテンシャルを使うので測定系による干渉をなくすることができる。同様に静電ポテンシャルの測定は端子間のコンダクタンスのリングを通過する磁束に対する依存性を測定することで行う。静電ポテンシャルの測定に磁束を使うので測定系による干渉を除去することができる。磁束は静磁束かあるいは測定が追従できる程度の低周波の交流磁束で変調するのがよい。実際の測定ではノイズの問題もあって後者の方がよい。本発明は、電子の弾性散乱長の数倍程度までの長さの細線でリングを形成し、このリングの対称の位置に端子を設け、この二端子でリングを区切ったときの少なくとも片方のリングに静電ポテンシャルを印加し、電子波が端子からそれぞれリングの半環を伝搬するときに前記静電ポテンシャルの印加の有無で位相が変調される効果と、リングを通過する磁束によって位相差が変調される効果（AB効果）の両方の効果によって電子波の干渉効果を起こし、これによって端子間に流れる電流の変化を起こさせるAB効果素子であって、静電ポテンシャルを変化*

$$\phi = \frac{\sqrt{2m}}{\hbar} (\sqrt{E+eV} - \sqrt{E}) L$$

（ここで ϕ はリングの二つの半環を電子波が通過したときに生じる位相差、 m^* は電子の有効質量、 \hbar はディラック定数（ $\hbar/2\pi$ ）、 E は電子のフェルミエネルギー、 e は電子の電荷、 V は静電ポテンシャル、 L はリングの半環それぞれの経路長である。）

【0015】なおこのとき強磁場を印加して電子が円運動を描く軌道半径（ランダウ軌道半径）がリングの太さよりも小さく電子がリングの端の沿ってリングを通過するようにして電子の有効質量を測定すると精度が向上する。

【0016】また、静電ポテンシャルと、リングの半環のそれぞれの径路長 L と、フェルミレベルの電子波長を下記の式を満足するようにして、二端子間のコンダクタンスの磁束依存性が磁束量子 Φ_0 （ $\Phi_0 = h/e$ ）の周期で鋭いピークを示し、それ以外ではほぼ0になるような共鳴条件を満足させ、この条件下で隣接したピーク間の磁場を測定し、磁場の位相差 $\theta = 2\pi$ としたとき $2\pi = BS/\Phi_0$ から磁束量子 Φ_0 を測定する。

【0017】

【数4】

$$(\sqrt{2m^*/\hbar}) \sqrt{E} L = n\pi$$

$$\phi = 1\pi$$

【0018】（ここで θ 、 ϕ はリングの二つの半環を電子波が通過したときに生じる磁場およびポテンシャルの位相差、 m^* は電子の有効質量、 B は磁束密度、 S はリングの面積、 n 、 l は整数である。）

【実施例】（実施例1）図1に本発明の第1の実施例を示す。図1（a）はその概念を示す図であり、図1

（b）は具体的な構造の例を示す図である。この実施例

6

* させることによって生じる電流変化を読み取ることによってリングを通過する磁束強度を測定することを特徴とする。

【0012】またこの素子で、静電ポテンシャルを変化させる代わりに、リングを通過する磁束を変化させることによって端子間に流れる電流の変化を読み取り、リングの二つの半環部にそれぞれ作用する静電ポテンシャルを測定する。

【0013】また、このAB効果素子を複数段接続することによって、静電ポテンシャルまたは磁束による伝導度変調を急峻にする。これに加えて静電ポテンシャルまたは磁束によって伝導度変調を調整する。またAB効果素子で、静電ポテンシャルを変化させたときのコンダクタンスの周期的な変化を測定し、その周期を下記理論式と比較することによって電子の有効質量を測定できる。

【0014】

【数3】

では静電ポテンシャル V によるコンダクタンス G の変化からリングを通過する磁束 Φ を測定する。図1に示したリングは、その材質としてはGaAs等の半導体でも、また金属でもかまわない。作製法の一例としては図1

30 (b)に示したような、GaAs基板（図示せず）の上にノンドープGaAs層7を設け、その上にSiドープAl_xGa_{1-x}As層8を形成してGaAs層7との界面に二次元電子ガスを形成し、リソグラフィ工程でリング状に残す方法がある。このリングは電子がバリスティックに走行するために長さが電子の弾性散乱長より十分に短く、また電子の一次元の導体とみなせるような非常に細い細線によって形成されることが好ましい。このようなリングに、同じ細線による端子3、4をリングの対称の位置に設け節点5、6にする。リングのそれぞれの半円部を半円形リング1及び2とする。半円形リング1、2の長さ L は電子の弾性散乱長に比べて短いものとし、この間を電子は殆ど散乱されずに通過できるものとする。また、半円形リング1上には電極9が設けられている。ここでは細線の側面に電極9を設けている。電極の材質としては金属が望ましい。更に、この反応系における温度は、フォノン散乱が無視できる程度の低温（ここでは4、2K程度）とする事が望ましい。

【0019】本発明ではこのリングに磁束 Φ を通過させ、更に半円形リング1に電極9を通じて静電ポテンシャル V を同時に作用させる。このとき、節点5で枝分か

50

(5)

7

れし、半円形リング1、2を通過して節点6に達した電子の波動は磁束 Φ と静電ポテンシャル V によって位相の変調を受け、節点6で合成波を形成した時の二つの電子波の位相差によって干渉パターンを形成する。そのため、端子3、4間のコンダクタンス G が磁束 Φ 及び静電ポテンシャル V の関数として図2に示すように振動的な振る舞いを示す。但し、図2では標準のコンダクタンス $G_0 = e^2/h$ に対する比（正規化コンダクタンス）で示してある。この V に対する G の振動パターンは同図から明らかなように磁束密度 B （同図では0、0.05、0.103、0.207テスラの場合を表示）によって*

$$\theta = \frac{e}{c h} \Phi \quad (1)$$

$$\phi = (2m^*/h) (\sqrt{E+eV} - \sqrt{E}) L \quad (2)$$

【0022】但し、 θ の正の方向はリングを貫く磁場の方向で決まり、 ϕ の正の方向は静電ポテンシャル V （バイアス）を印加した方の半円形リング1の位相変化から印加しない方の半円形リング2のそれを差し引いたものとする。また e は電子の電荷、 c は光速、 h はプランクの定数、 m^* は電子の有効質量、 E は電子のエネルギー ※

$$G = (2e^2/h) \int |T_{tot}(E)|^2 \left(-\frac{\partial f}{\partial E} \right) dE \quad (3)$$

【0024】ここで T_{tot} は系における透過確率、 f はフェルミディラックの分布関数である。ここで T_{tot} は

$$T_{tot}(\theta, \phi) = TR1 / (TR2 \cdot TR3 - TR4) \quad (4)$$

$$TR1 = \epsilon e^{i(KL - (\theta/2))} \{ 1 + e^{i(\theta+\phi)} - e^{i(KL+\phi)} (e^{i(\theta+\phi)} + e^{i2\phi}) \} \quad (5)$$

$$TR2 = 1 - e^{2iKL} (a^2 + b^2 e^{i(\phi-\theta)}) \quad (6)$$

$$TR3 = 1 - e^{2iKL} (a^2 e^{2i\phi} + b^2 e^{i(\phi+\theta)}) \quad (7)$$

$$TR4 = a^2 b^2 e^{i(4KL+\phi)} (e^{i(\theta/2)} + e^{i(\phi-(\theta/2))})^2 \quad (8)$$

【0026】で与えられる。但し

【0027】

$$K = \sqrt{2m^*E}/\hbar \quad (9)$$

【0028】 a 、 b 、 ϵ は節点5、6における電子波の反射と透過を表す散乱行列の成分であり、

$$a = \frac{1}{2} e^{i\phi} (\sqrt{1-2\epsilon} - 1) \quad (10)$$

$$b = \frac{1}{2} e^{i\phi} (\sqrt{1-2\epsilon} + 1) \quad (11)$$

【0030】と定義される。 p は $a-b=eip$ で定義される位相である。本実施例では $L=1000$ オングスト

*変化する。従って測定すべき磁束密度 B の下での $G-V$ 曲線を測定し、それと理論 $G-V$ 曲線とのフィッティングによって磁束密度 B の測定値を決定することができる。

【0020】このような測定が可能となる原理の概略を以下に説明する。図1で磁束 Φ またはポテンシャル V によるリングを通過した2つの電子波の位相差 θ 及び ϕ はそれぞれ次式で与えられる。なお θ は磁束のみの位相差、 ϕ はポテンシャルのみの位相差である。

【0021】

【数5】

※一、 L は半円形リング1または2の通路の長さである。

また磁束 Φ はリングを通過する磁束密度を B 、リングの面積を S とすると $\Phi=BS$ で与えられる。次に1次元2端子素子のコンダクタンス G は次式で与えられる。

【0023】

【数6】

★【0025】

【数7】

★

☆【数8】

☆

◆【0029】

【数9】

ローム（4.2K程度では電子の弾性散乱長は $GaAs$ で数 μm である）、 $m^*=0.067m_e$ （ $GaAs$ 、

(6)

9

m_e は自由電子の質量)、GaAs の場合 $\epsilon = 0.5$, $a = -0.5$, $b = 0.5$, $p = 0$ で、半円形リング 1、2 は完全に対称とし、節点 5、6 間の電子波動の伝搬も右向きと左向きで同じとなるように半円形リング 1 と 2 を通過する電子の散乱行列成分を単純化してある。

【0031】この測定法では磁場の測定に静電ポテンシャルを利用するだけであるから、何ら被測定系に磁場を作用させずに測定することが出来る。このことは例えば磁性体の弱磁場を測定する場合に極めて有効である。また微弱な磁場を測定する場合、磁束をかせごうとするとリングの面積を大きくしないといけない。これは磁場の場所による分布を測定する場合空間分解能を落とすことを意味する。しかるに本発明の素子ではリング内を貫通する量子磁束が 1 個以下の場合でも精度よく測定出来るので極めて高感度で且つ空間分解能のよい磁場測定が可能となる。

【0032】なお図 1 では電極 9 は細線の側面に設けたが、細線の上、下あるいは上下両方に設けてもよい。

【0033】(実施例 2) 本発明の第 2 の実施例では第 1 の実施例と同一構造の素子でリングを通過する磁場によるコンダクタンス G の変化からリングに印加された静電ポテンシャルを測定する。図 3 にコンダクタンス G と磁束密度 B との関係を示す (G/G_0 で表示)。コンダクタンス G は磁束密度 B に対し振動的な振る舞いを示す。ここで $L = 1000$ オングストローム、 $m^* = 0.067 m_e$ 、GaAs の場合 $\epsilon = 0.5$, $a = -0.5$, $b = 0.5$, $p = 0$ である。リング内は完全にバリスティック伝導であるとした。図 3 から明らかなように B に対する G の振動パターンは静電ポテンシャル V によって変化する。従って $G-B$ 曲線を測定し、それと理論 $G-B$ 曲線とのフィッティングによって静電ポテンシャル V の測定値を決定することが出来る。

(実施例 3) 図 4 は本発明の第 3 の実施例であり、第 1 の実施例と同一構造のリング 10 を端子 12、13 の間に三つつなぎ、 V をバイアスとした三端子の素子を構成した、静電ポテンシャルによる伝導度変調装置である。各リングの一方の半円形リングには同一ポテンシャル V を印加している。このポテンシャルによってコンダクタンスが振動する。リングを多段に接続することによって、図 5 に示すようにポテンシャルによるコンダクタンスの変化の度合いが急峻になり、その結果この素子をトランジスタとして用いたときトランジスタの立ち上がりが速くなるつまりスイッチング特性が向上する。

【0034】(実施例 4) 図 6 は本発明の第 4 の実施例である。本実施例は第 1 の実施例のリングを複数個直列に接続した、磁場による伝導度変調器である。図 6 ではリング 1 に端子 15、16 をつけそれぞれ同一磁束 Φ が貫通し、しかも静電ポテンシャル V がそれぞれのリングの一方の半円形リングに印加されている。多段接続により伝導度変調の度合いが急峻になる。その結果トランジ

10

スタに用いたとき第 3 の実施例と同様な効果がある。

【0035】また静電ポテンシャルを変えることによって伝導度変調の度合いを変えることが出来る。先に示した図 3 はリングが一つの場合の $A-B$ 効果の磁場依存性について示した図であるが、コンダクタンス G のカーブの”振幅”、”振動数”、”位相”は静電ポテンシャル V の値によって変化している。数個連結した場合でも、この 1 つの場合と同様にコンダクタンスの”振幅”をポテンシャル V により増大させたり減少させたりが可能であり、また”振動数”や”位相”も変調することができる。静電ポテンシャル V を $\phi = (n+1/2)\pi$ (n は整数) になるように選ぶと、コンダクタンス G が普通、磁束の関数として磁束量子 $\Phi_0 = h/e$ の周期を持つものに対してその半分の周期 $1/2 \Phi_0$ の周期を持つようにすることができる。”振動数”を二倍にすることができる。これらの性質は伝導度の変調による信号と雑音の識別に有効である。

【0036】また静電ポテンシャルの値が V_1 、 V_2 のときの、磁束に対するコンダクタンスの周期的なカーブ G_1 、 G_2 を測定し、その差 ($G_1 - G_2$) のカーブを求める。差のカーブは G_1 、 G_2 のカーブより鋭いピークを持った周期的なカーブになるので、コンダクタンスの周期的なカーブそのものを測定するより、”振動数”を精度よく測定し周期を読み取ることができる。

【0037】(実施例 5) 本発明の第 5 の実施例は第 2 の実施例のリングを多段接続したものである。その結果、静電ポテンシャルによるリングの伝導度変調が急峻になり、しかもその度合いを磁界によって変えることが出来る。先に示した図 2 はリングが一つの場合の $A-B$ 効果の静電ポテンシャル依存性について示した図であるが、コンダクタンス G のカーブの”振幅”、”振動数”、”位相”は磁束密度 B の値によって変化している。数個連結した場合でも、この 1 つの場合と同様にコンダクタンスの”振幅”を磁界により増大させたり減少させたりが可能であり、また”振動数”や”位相”も変調することができる。伝導度変調が非常に微小な電圧で可能となりその度合いがさらに改善される。

【0038】(実施例 6) 本実施例では電子の有効質量の測定について述べる。第 1 の実施例の構造 (図 1) のリングを用いるが、ここでは磁界を印加しない。図 2 の中に $B = 0$ テスラのときの $G-V$ 曲線が示してある。ここで G が最小になる電圧 V を読みとる。次に、ここでは絶対温度 T が 0 K 付近を考えるので実施例 1 の (3) 式で

【0039】

【数 10】

$$-\frac{\partial f}{\partial E} = \delta(E - E_F)$$

【0040】となることから

$$G = (2e^2/h) \cdot |T^{\dagger} 0^{\dagger} (E_F)|^2$$

(7)

11

となる。これから、エネルギーは、フェルミエネルギーをとればよいことがわかる。このあと(2)式から電子の有効質量 m^* を決定するわけである。そのためにはあと L , e , h , ϕ の値を代入しなければならない。 L , e , h はすでにわかっている。またコンダクタンス G はポテンシャル V の位相差 ϕ に対し周期 2π で変化するの*

$$2\pi = \frac{\sqrt{2m^*}}{\hbar} \cdot L | (\sqrt{E_F + eV_1} - \sqrt{E_F}) - (\sqrt{E_F + eV_2} - \sqrt{E_F}) |$$

(ここで $T \approx OK$ とした)

【0042】とする。ここで e , h , L は既知とすると有効質量 m^* を決定することができる。なお ϕ と V の関係は必ずしも $G-V$ 曲線の極小点で読み取る必要はなく、実測曲線が理論曲線と一致するように m^* を決定する方が精度が向上する。具体的には G と V の関係を理論式(3)を用いて最小自乗法でフィッティングする。なお(従来の技術)の欄で述べた特開平1-226182号公報ではリングを構成する材料が超伝導材料であるが、一般に超伝導リングにおける AB 効果では静電ポテンシャルによる位相シフトはなく、従って本実施例のようにしてキャリアの有効質量を決定することはできない。

【0043】(実施例7)図1の測定装置で強磁場をリング10を貫くように印加する。それにより電子は円運動(サイクロトロン運動)を行う。その軌道半径(ランダウ軌道半径)がリングの幅(太さ)よりも充分小さくなるような強度の磁場とする。このような条件下では電子は半円を描いてリングの端に衝突しては次の半円を描くという軌道を繰り返しながらリングを通過する。このような電子のパスをエッジチャンネルといい、電子の後方散乱の確率が0磁場のときよりも少なくなることが知られている。リング中の不純物等に起因する乱れがリングの太さと同程度またはそれ以下ならば、磁場が強いほど電子のエッジチャンネルは狭くなり不純物などによって散乱される度合いは減少する。 $G-V$ 曲線は電子がバリスティックに伝導しているとき振幅が大きい即ちコンダクタンス G の変化が大きい。従って強磁場を印加してエッジチャンネルを形成して測定した場合は、エッジチャンネルを利用しない弱磁場の場合に比べてより一層電子の有効質量 m^* を精密に測定できる。

【0044】(実施例8)本実施例では磁束量子 Φ_0 の測定について述べる。本実施例でも図1と同じ構造のリングを用いる。今4.2K近辺の十分低温の場合を考え、電子のフェルミエネルギーに対する波数 k とリングの周囲長 $2L$ の間に

$$kL = n\pi \quad (n \text{ は整数})$$

が成立したとする。 $\phi = 1\pi$ (1 は整数)つまり

【0045】

【数12】

12

*で、 $G-V$ 曲線で隣合う二つの極小値についてそれぞれのポテンシャルを読み取り V_1 , V_2 とし、(2)式から V_1 , V_2 に対応する ϕ を求めそれらの差を 2π とおく、つまり

【0041】

【数11】

$$\phi = (\sqrt{2m^*}/\hbar) (\sqrt{E + eV} - \sqrt{E}) L = 1\pi$$

【0046】のとき式(4)から透過確率 $T_{tot}(\theta, \phi)$ の分子は常に0となる。従って分母が0でなければコンダクタンス G は θ の関数としてみたとき常に0になる。ところが $T_{tot}(\theta, \phi)$ の分母は θ と ϕ が共に π の偶数倍あるいは奇数倍のとき0になる。つまりこの条件のときコンダクタンスに共鳴がおこる。このときには分母と分子に0となる共通因子が現れこれが $T_{tot}(\theta, \phi) \rightarrow 0/0$ つまり不定になってしまう原因なので、この共通因子を約分してしまうとこの不定性がとれ $T_{tot}(\theta, \phi) \rightarrow 1$ となる。つまりこの条件を満たす θ で T_{tot} は1となり、それ以外の θ では0になる。従ってコンダクタンスは $T_{tot} = 1$ となる θ で鋭い極大を示す。例えばパラメータである静電ポテンシャル(電圧)を $\phi = \pi$ になるように設定すればコンダクタンスは $\theta = (2n+1)\pi$ (n は整数)でピークになる。これを示したのが図7である。この図で隣接したピーク間の磁場を測定して $\theta = 2\pi$ におく。次に $\theta = (e/h)BS$ (S はリングの面積)より $e/h = (2\pi\theta)/BS$ となるのでこれより e/h を決定できる。なお図中実線は $\phi = (2l+1)\pi$ のとき、点線は $\phi = 2l\pi$ (l は整数)のときを示している。

【0047】本実施例では特開平1-226182号公報に記載の超伝導リングを用いるものに比べ小型化できしかも超伝導リングを用いずに済むので製作も簡単である。

【0048】

【発明の効果】本発明により、高感度の磁界測定、ポテンシャル測定及び伝導度変調が出来る。また電子の有効質量を高精度に測定できる。また小型で作製も簡単な量子磁束測定装置が得られる。

【0049】なお本発明の基本原理は式(3)のコンダクタンス G を式(1)、(2)に含まれる二つの外部変数 ϕ , V によって制御できることを利用した点にある。従ってこうした概念による素子はすべて本発明に含まれる。また実施例ではすべてリングの半環の長さ l が弾性

50

(8)

13

散乱長に比べて短い場合で説明したが、 L が弾性散乱長より3～5倍程度の場合まで許容できる。また実施例ではリングの幅が極めて細く電子の一次元導体と見なせる条件で説明したが、次のような場合も本発明に含まれる。つまりリングが多少太くてフェルミレベル近傍に数個のエネルギー的に接近した伝搬する量子状態が存在する場合、即ち電子の伝搬のチャンネルが数本あってそれらの間の相互干渉が皆無のときおよび弱い干渉がある場合である。

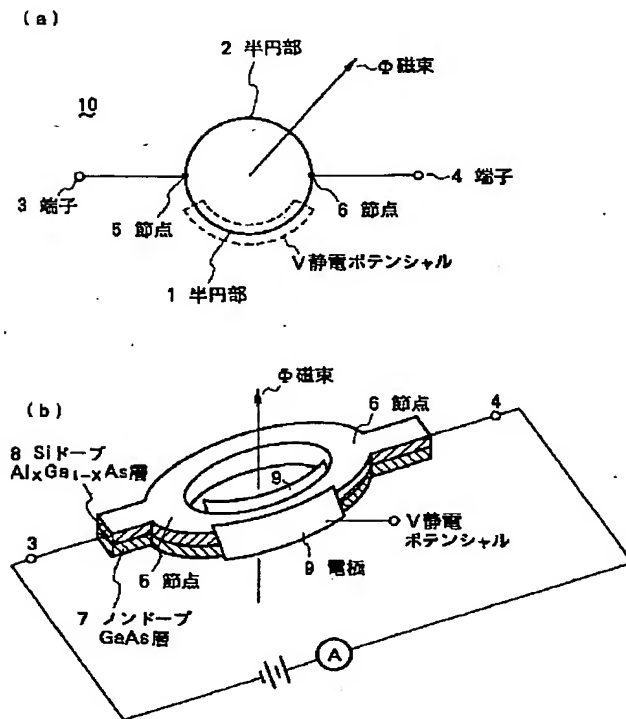
【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施例のAB効果素子の構成を示す図である。

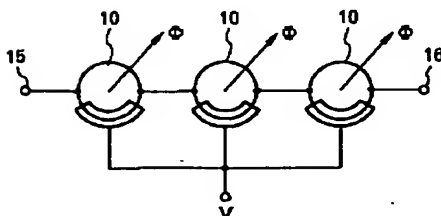
【図2】磁束密度をパラメータとした、コンダクタンスと静電ポテンシャルとの関係を示す図である。

【図3】静電ポテンシャルをパラメータとした、コンダクタンスと磁束密度との関係を示す図である。

【図1】



【図6】



14

【図4】AB効果素子を三段直列接続した三端子素子を示した図である。

【図5】コンダクタンスと静電ポテンシャルとの関係の段数による比較を示した図である。

【図6】AB効果素子を三段直列接続した三端子素子を示す図である。

【図7】コンダクタンスの共鳴を示す図である。

【符号の説明】

10 AB効果素子

1、2 半円形リング

3、4、12、13、15、16 端子

7 ノンドープGaAs層

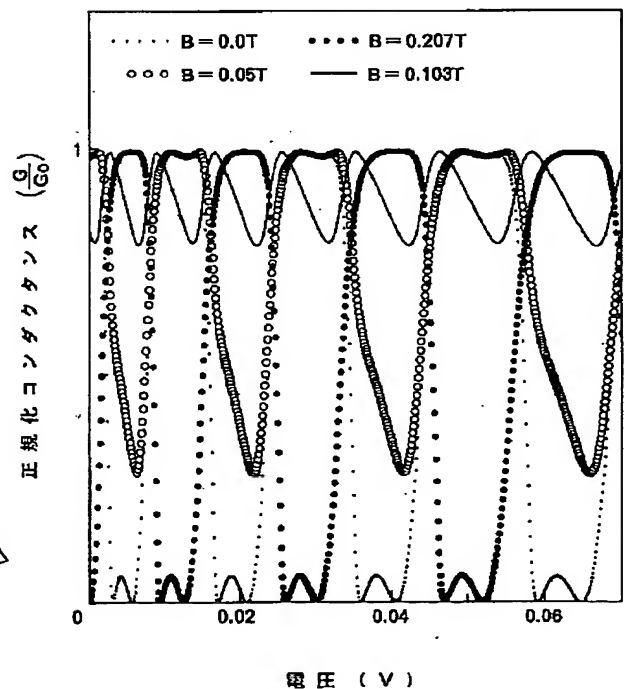
8 Siドープ $Al_xGa_{1-x}As$ 層

5、6 節点

Φ 印加磁束

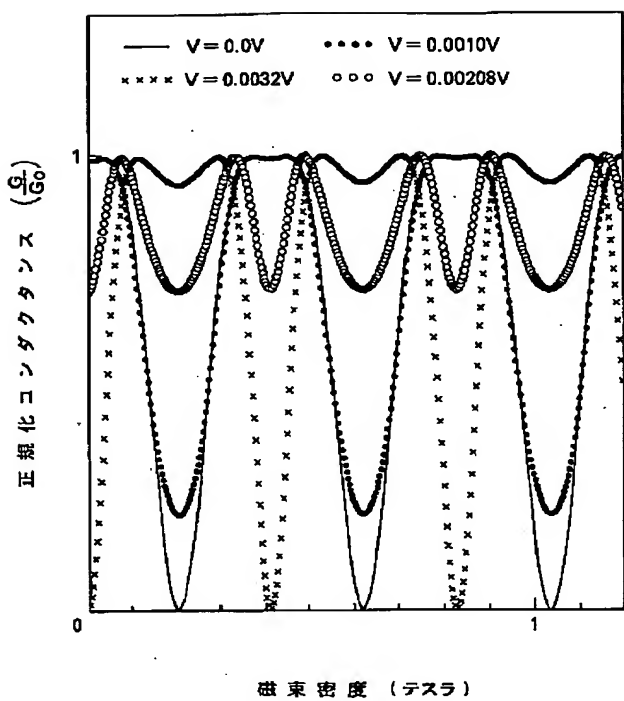
V 印加静電ポテンシャル

【図2】

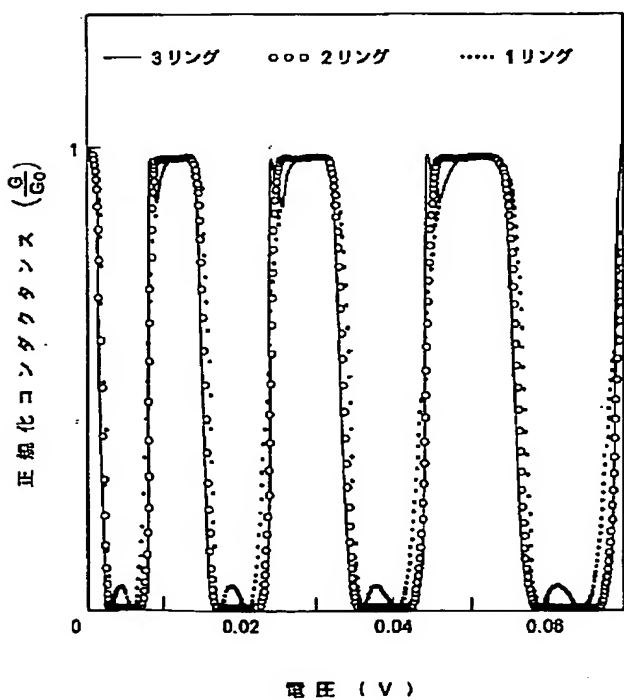


(9)

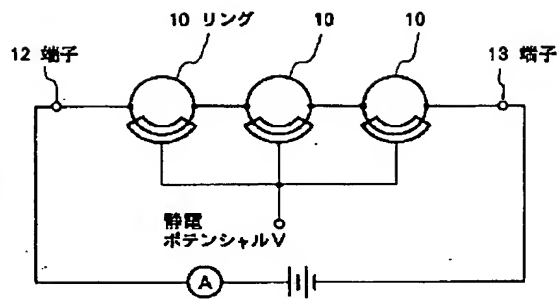
【図3】



【図5】



【図4】



【図7】

